УДК 550.831.05 (571.1)

СЕЙСМОМОРФОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПРИ КАРТИРОВАНИИ ВЫСОКОЁМКИХ КОЛЛЕКТОРОВ. II. РОЛЬ ТЕКТОНИЧЕСКОЙ ТРЕЩИНОВАТОСТИ В ФОРМЕ ПАЛЕОРЕЛЬЕФА И ФОРМИРОВАНИИ ПРОНИЦАЕМЫХ ЯЧЕЙ КОЛЛЕКТОРОВ

В.Н. Устинова, В.Г. Устинов

Томский государственный университет
E-mail: ustinova@ggf.tsu.ru

Решение литолого-фациальных задач на месторождениях нефти и газа может быть существенно дополнено результатами морфоструктурного анализа сейсмических поверхностей. Для изучения условий формирования, фациального типа коллектора, прогноза напряжённо-деформированных зон на поднятиях, определяющих ёмкостные свойства коллекторов, новые возможности открывает морфоструктурный анализ на основе типизации морфоформ и изучения связи характера распределения тектонических напряжений на поднятиях с типом структур.

Важной стороной интерпретационного процесса, при решении литолого-фациальных задач по данным сейсморазведки, является классификация форм рельефа палеоповерхностей. Детальные реконструкции палеорельефа, в том числе с использованием 3D-сейсморазведки, кроме возможности картирования и анализа фаций позволяют получать сведения о характере распределения тектонических напряжений на поднятии, картировать с применением различных методов морфоструктурного и морфотектонического анализа тектонические нарушения, зоны тектонической трещиноватости. Начиная с анализа рельефа, следует прибегнуть к разработанным для форм рельефа классификациям. Рельеф, как известно, классифицируется по морфологическим, ландшафтно-геологическим, тектоническим и др. признакам. Классификационные схемы рельефа, нашедшие применение при решении историко-геологических, геотектонических, геоморфологических задач, предложены Н.А. Флоренсовым, И.П. Герасимовым, Д.А. Тимофеевым, А.Н. Ласточкиным и др., имеют важное практическое значение, позволяют разрабатывать собственные схемы элементаризации и обобщения форм рельефа для решения практических задач нефтегазовой отрасли.

Устойчивость, повторяемость форм палеорельефа позволила авторам статьи, с опорой на имеющиеся представления о задачах и методах ранжирования морфоформ, создать собственную классификацию (рис. 1), разработанную, в первую очередь, с целью изучения особенностей и характера проявления в палеорельефе фаций песчаных отложений – потенциальных коллекторов, роли тектонической трещиноватости в формировании облика рельефа и зон высокоёмких коллекторов.

Геометрический облик структур тесно связан и во многом определяется наличием и пространственной ориентировкой систем тектонических напряжений, тектонических трещин. Каким образом эти системы трещин ведут себя в полях сейсмических параметров? На временных сейсмических разрезах трещиноватость проявляется в виде зон поглощения, "грабенообразных" смещений осей синфазности. Более уверенно эти системы трещин выявляются в рельефе палеоповерхности. Достаточно контрастно, в виде систем ортогональных разнопорядковых трещин, проявляется регматическая трещиноватость. Эта трещиноватость, участвуя в формировании структурных поверхностей, проявляется, в первую очередь, в избирательности ориентировок структур и их элементов (рис. 1, тип 1, 3, 4, 5, 6, 9, 11). В пределах Западно-Сибирской плиты выявляется четыре преобладающих ориентировки в системах трещин: северо-западные, северо-восточные, субмеридиональные и широтные, которые определяют строение рельефа. Согласно классификации С.С. Шульца [1], можно выявить несколько порядков тектонических трещин, ограничивающих вложенные блоки характерной размерности. Кроме размерности, пространственной ориентировки, тектоническая трещиноватость характеризуется глубиной проникновения. Согласно исследованиям К.И. Микуленко и др.

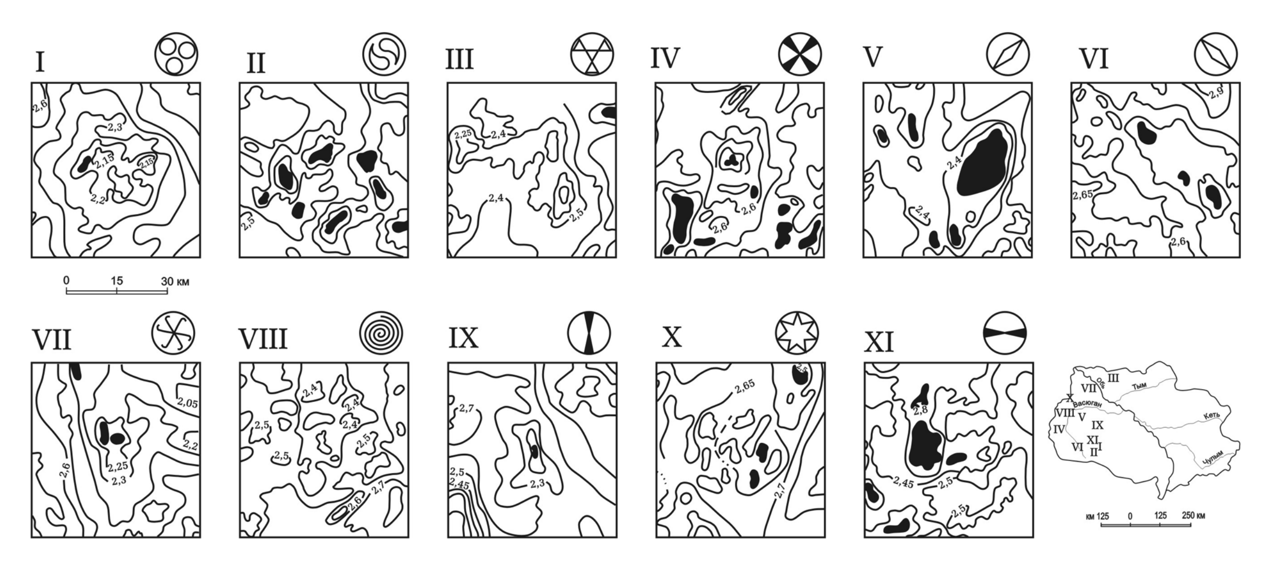


Рис. 1. *Типовые морфологические формы палеоповерхности юры. Типизация выполнена с использованием структур II порядка по отражающему горизонту IIа юго-восточной части Западно-Сибирской низменности (стратоизогипсы с сечением 0,2 км согласно структурной карте под ред. В.М. Тищенко, 1992): I) Горелоярское куполовидное поднятие; II) юго-восточная часть Нюрольской впадины; III) Окуневское куполовидное поднятие; IV) Моисеевское куполовидное поднятие; V) Мыльджинский вал; VI) Лавровский наклонный вал; VII) Полуденное поднятие; VIII) южная часть Нововасюганского вала; IX) Соболиный вал; X) Ледовое куполовидное поднятие; XI) Останинский вал*

[2], нарушения северо-восточной и северо-западной ориентировки считаются сквозными, субмеридиональные – затухают в осадочном чехле, субширотные – затухают в фундаменте. То есть изменчивость облика структур в разнопорядковых циклитах определяется и тесно связана с изменчивостью и циклической возобновляемостью перераспределения напряжений в системах тектонической трещиноватости разной ориентации и ранга.

Изучение кинематики тектонических дислокаций и характера их влияния на геолого-тектонические процессы – путь к системному представлению о динамике формирования и возрастной изменчивости разнопорядковых структурных поднятий; о положении коллектора на структуре; к выявлению напряжённо-деформированных и высокоёмких участков коллектора.

Так, *основными критериями выделения трещин* по сейсмоданным являются: наличие зон поглощения, "грабенообразных" осложнений, смещения осей синфазности на временных сейсмических разрезах [3], наличие контрастных отрицательных (и положительных в их обрамлении) аномалий в скоростном поле, на скоростных разрезах и в спектрах величин эффективной скорости. Морфологическое проявление систем трещин в палеорельефе характеризуется врезами, линейным простиранием террас; прямоугольными уступами; линейным простиранием палеодолин. С учётом этих критериев авторами разработана методика морфологического трассирования систем трещин. Согласно известной классификации (А.Н. Криштофович), трещины характеризуются как скрытые, открытые и закрытые. *Степень открытости зон трещиноватости* может быть определена: по интенсивности аномалий величин скорости (в системах трещин выявляются линейно-вытянутые аномалии $V_{\text{ОГТ}}(x)$ интенсивностью до 200...250 м/с, величина аномалий резко возрастает в нефтегазонасыщенных зонах); наличию "грабенообразных" изгибов осей синфазности на временных сейсмических разрезах, высокоградиентных краевых участков врезов, бровок террас, линейных уступов; по ширине зон активного влияния дислокаций, являющихся результатом избирательности процессов эрозии и проявляющихся в увеличении ширины эрозионных форм рельефа [4], с шириной интервала эрозионной проработки рельефа для открытых трещин порядка 500...200 м, скрытых – 200...50 м и закрытых – менее 50 м. Трещины, проявляющиеся в рельефе палеосводов, по степени раскрытости относятся к трещинам II и III порядков [1]. Раскрытость трещин определяется приуроченностью поднятий к региональным и локальным зонам транспрессии и транстенсии, формирующихся, в том числе, локально на этапах осадконакопления в мобильной полосе палеоберега. Для них, согласно облика проявления и особенностям замыкания структурных линий, характерны: усиление динамических напряжений в линейных (рис. 1, тип 9, 11, 6, 5), радиальных (рис. 1, тип 10, 3, 4, 7), кольцевых (рис. 1, тип 7, 8) системах трещин; с преобладанием в форме структуры северо-западных (рис. 1, тип 6), северо-восточных (рис. 1, тип 5), меридиональных (рис. 1, тип 9), широтных (рис. 1, тип 11) ориентировок; трёхзональный (рис. 1, тип 3, 1), либо сигмоидный (рис. 1, тип 2) облик в сочетаниях тектонических напряжений, которые, есть суть сочетания эрозионных форм рельефа [4], определивших на этапе осадконакопления облик устья реки (рис. 1, тип 3, 1), конуса выноса (рис. 1, тип 10, 4, 7), валообразного осложнения либо дель-

товой протоки (рис. 1, тип 9, 11, 6, 5), периферического бара (рис. 1, тип 9, 11, 2), построек пляжа, зоны берегового клифа (рис. 1, тип 7, 8), дистальной части береговой зоны (рис. 1, тип 8).

Особенности проявления систем трещин в рельефе палеоповерхности, характер их влияния на строение коллекторов рассмотрены ниже на примерах двух месторождений, продуктивных в верхней части фундамента: Северо-Останинского и Южно-Тамбаевского (преобладающие типы – 7, 8, рис. 1), и двух верхнеюрских месторождений: Двуреченского (преобладающий тип 7, рис. 1) и Западно-Моисеевского (преобладающий тип 6, рис. 1). Северо-Останинское (рис. 2) и Южно-Тамбаевское (рис. 3) месторождения расположены в прибортовых частях Колтогорско-Уренгойской и Чузикской рифтовых зон. Морфоформы поднятий формировались в условиях сложной системы деформирующих усилий близ узла сочленения рифтов, что способствовало возникновению напряжений транспрессивного типа. В сводовой час-

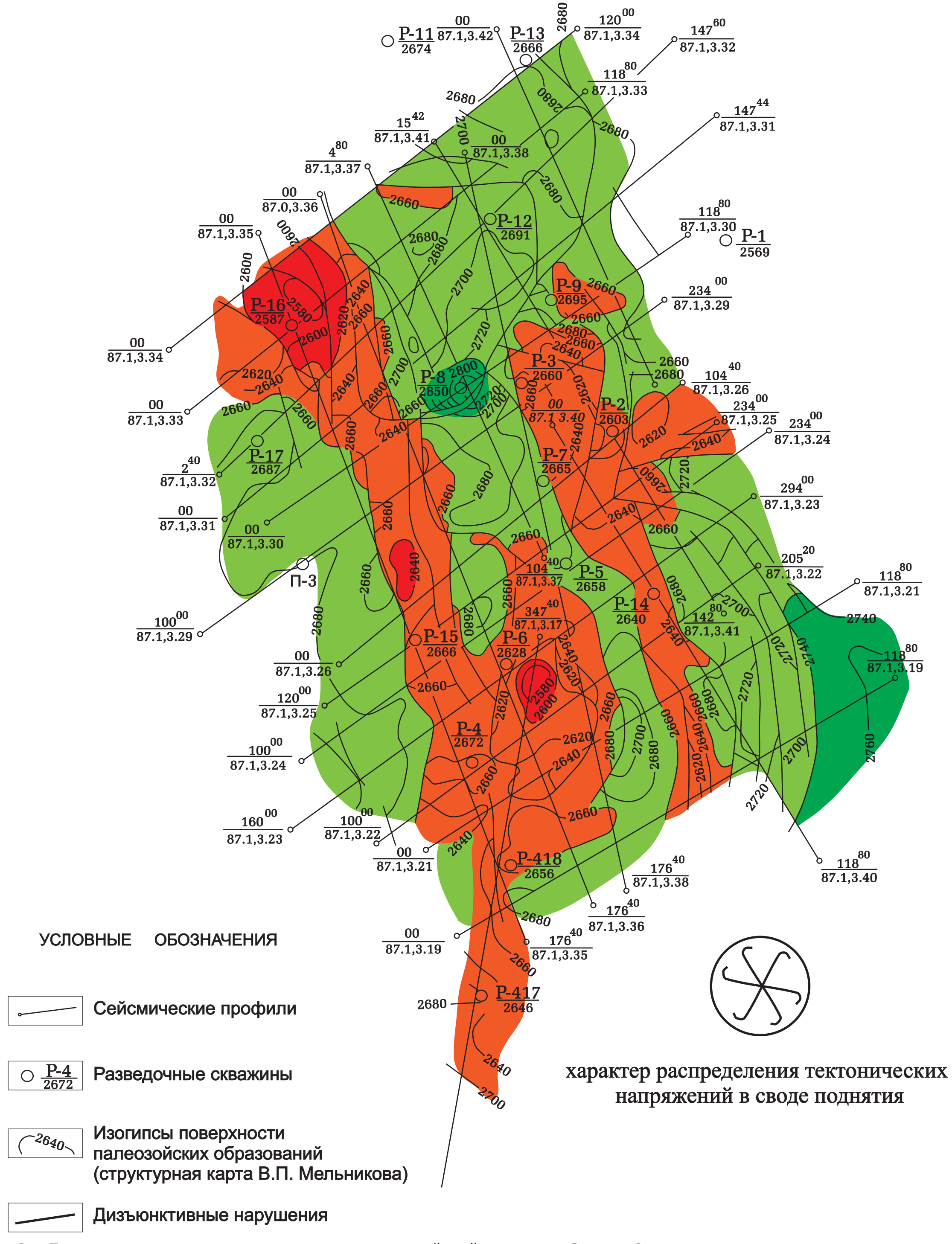


Рис. 2. Тектоническая трещиноватость в своде палеозойской структуры Северо-Останинского месторождения

ти Северо-Останинской структуры, в направлении северо-восточного (скв. 12, 13, 11) и юго-западного (скв. 417, 418, 4, 6, 15) замыканий, сформировались две наиболее контрастных зоны сдвиговых деформаций, в условиях наличия слабых растягивающих напряжений. Центральная (скв. 7, 3, 2, 9) и северо-западная (скв. 16, 17) зоны сформировались в условиях преобладания сжимающих усилий, причём степень сжатия, характеризующаяся проявленностью в рельефе скрытых трещин (интервалы проявления в рельефе не более 50 м), в центральной зоне несколько выше. Напряжённые зоны имеют сигмоидный облик, свойственный такого рода структурно-тектоническим формированиям взбросово-сдвигового характера (по М.Л. Коппу [5]). Сочетание напряжений сжатия и растяжения стало причиной образования на структуре дивергентно-веерной системы трещиноватости (рис. 2) с максимальной раскрытостью в системах трещин в юго-западном и северном обрамлении поднятия, что проявляется в наличии трещинных пород, но в отсутствии промышленной продуктивности в скважинах 8, 11, 13, 16; 6, 15, 418. На юго-западном и северном периферийных замыканиях структуры выявляются "открытые" трещины (устанавливается в рельефе поверхности и в керновом материале). Системы трещиноватости третьего и четвёртого порядков в узлах пересечения на локальных участках свода образовали зоны повышенной трещиноватости коллектора (скв. 2, 3, 7, 14). "Открытые" трещины проявились в рельефе палеоповерхности увеличением ширины зон врезов, увеличением глубины их проявления и краевых градиентов по палеоповерхности. В таких трещинных зонах на поднятии не выявлена продуктивность, зачастую, они служат путями подтока флюидов, при скважинном опробовании водоносны или быстро подтягивают воду. Северо-Останинское поднятие (рис. 2) в кровле палеозойского фундамента является, согласно расположению структурных линий, структурой "левого вращения" [18], чем объясняется слабая, в отдельных локальных блоках, испытывавших "правое вращение" [18], нефтегазоносность поднятия, тяготеющая к близкупольным частям положительных структурных форм центра и северо-западного склона структуры.

Близкий характер расположения систем трещин наблюдается на месторождении, представленном на рис. 3. Сводовую часть поднятия осложняет зона тектонической трещиноватости субмеридионального простирания (второго порядка в классификации С.С. Шульца [14]). Максимальная раскрытость трещин (по особенностям проявления трещин в палеорельефе, карта тектонической трещиноватости построена авторами по структурной карте поверхности фундамента масштаба 1:25000) прогнозируется в юго-западной и северной частях поднятия. "Открытые" трещины имеют северо-восточное и меридиональное простирание. По характеру расположения систем "открытых" трещин можно предположить формирование структуры в условиях "левого вращения" и транспрессивных деформаций в центральной части структуры, что привело к образованию пустотно-порового пространства нефтегазонасыщенных ячей коллекторов на участках дивергентно-веерного "скучивания" (по А.Н. Ласточкину) пород фундамента. В результате объемного "вращения" в центральной части

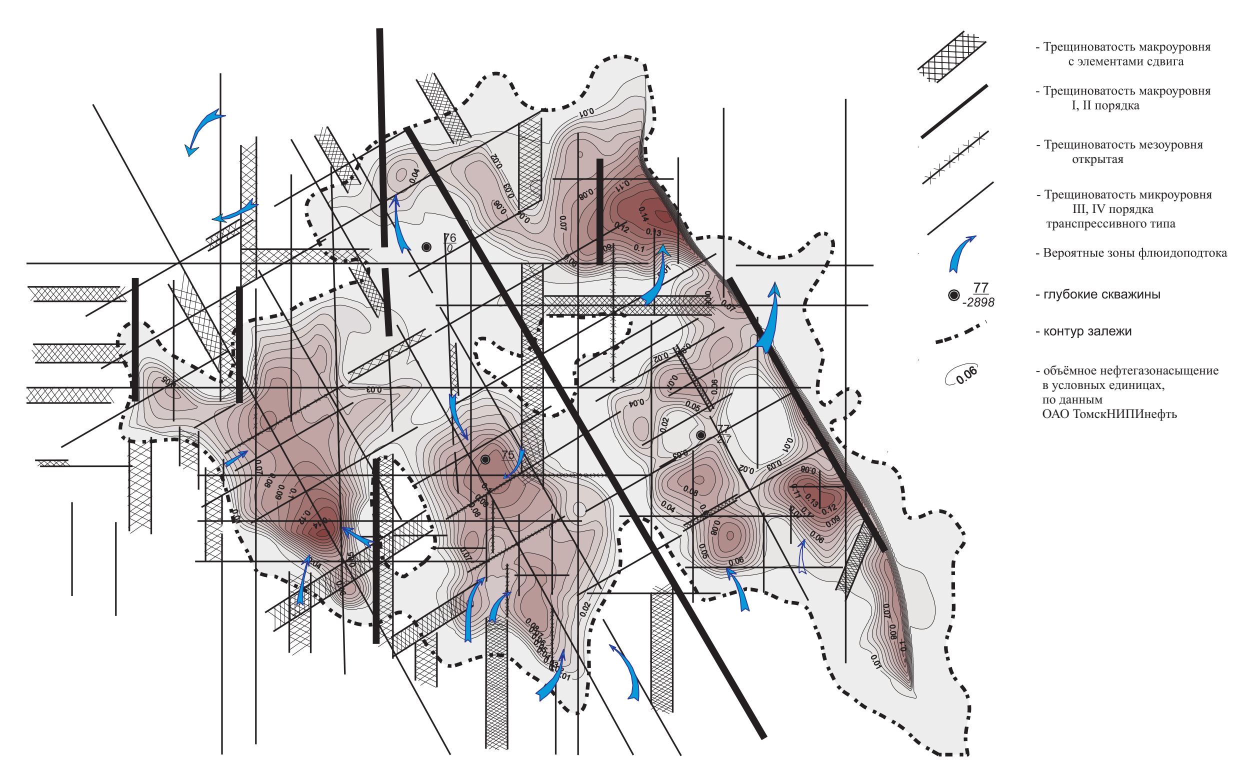


Рис. 3. *Степень тектонической трещиноватости в контуре палеозойской залежи углеводородов Южно-Тамбаевского месторождения*

структуры образовалась сигмоидного типа зона повышенной трещиноватости, коррелирующаяся с наиболее высокими отметками рельефа палеоповерхности. Открытые системы трещин (скв. 76 расположена близ узла пересечения трещин второго порядка) могли стать зонами подтока флюидов из обрамляющих впадин. Нефтегазоносность приурочена к дугообразным зонам рельефных осложнений поднятия, формирующих систему двойных кольцевых полос с сигмоидным сегментом в центре структуры и трехзональными рельефными формами в её южном обрамлении (трещиноватость закрытого типа коллектора в скв. 77 подтверждается керновым материалом, скважина расположена близ узла пересечения тектонических трещин северо-восточного, северо-западного и широтного простирания третьего и четвёртого порядков). Кольцевой облик структурных замыканий подня-

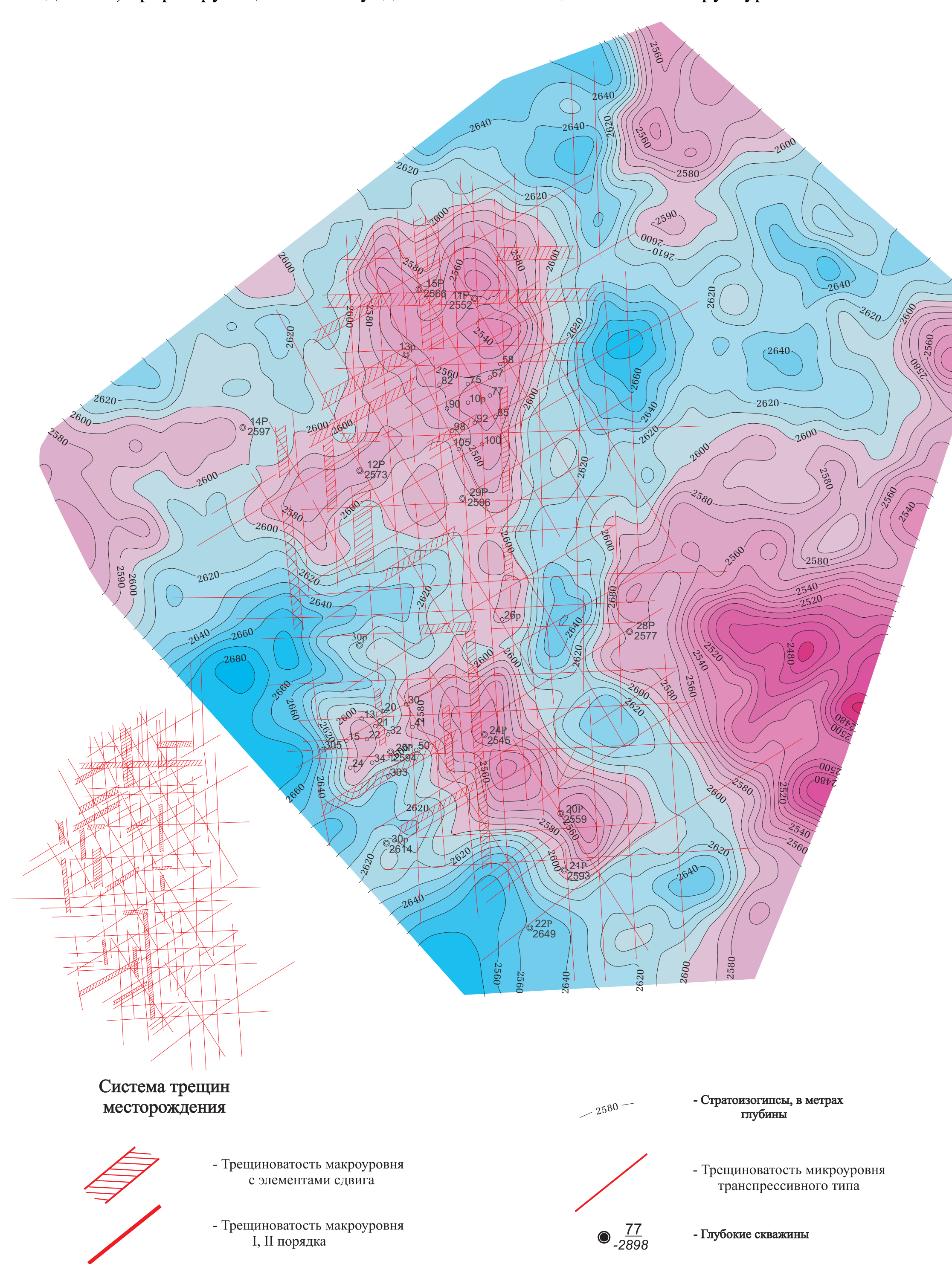


Рис. 4. *Тектоническая трещиноватость в своде верхнеюрского поднятия Западно-Моисеевского и Двуреченского месторождений: структурные построения В.Г. Кужелева*

тия (рис. 1, тип 9) говорит о формировании известняков свода в условиях прибрежного атолла, либо накоплении среднепалеозойских известняков на унаследованной (возможно, вулканического происхождения) кольцевой структуре фундамента.

Карта тектонической трещиноватости для Двуреченского (северный купол) и Западно-Моисеевского (южный купол) поднятий приведена на рис. 4, построена по сейсмическим данным, система трещин выявлена по результатам морфоструктурного анализа по отражающему горизонту II_a. Степень раскрытости трещин оценивалась качественно, с использованием морфологического прослеживания по бровкам террас, системам врезов на поднятии, с учётом эрозионной проявленности уступов и линейных морфоформ ("профилирование рельефа" [4]), с учётом величин экстремальных приращений отметок поверхности (отражающий горизонт II_a), а также по наличию зон поглощения на временных сейсмических разрезах. Степень влияния тектонической трещиноватости на фильтрационные свойства коллекторов оценивалась, в том числе, по керновому материалу скважин.

В пределах Двуреченского поднятия (рис. 4) максимальная "открытость" трещин выявляется в его северной части. В северном обрамлении поднятия контрастно в морфологии свода проявляются тектонические трещины меридионального и северо-восточного простирания, образующие эллиптически-расходящуюся канальную систему "отрицательных" (килевых по А.Н. Ласточкину) структурных линий. Направление изгибов структурных линий определяет поднятие как структуру "левого вращения" (по Я.Г. Кацу и др. [6]), в соответствии с чем, может прогнозироваться максимальная раскрытость трещин и наличие элементов транстенсии в северном и юго-западном периклинальных замыканиях структуры. Раскрытость трещин, приуроченность их к зонам транстенсивных напряжений, может быть причиной относительно низких дебитов либо их отсутствия в скв. 12, 13, 15, 11 северного купола. Сводовая часть Двуреченской структуры имеет сложное распределение полей напряжений. Структура формировалась в условиях слабого "левого вращения", при котором, как правило, существенны растягивающие напряжения и возрастает степень раскрытости трещин. Такие поля напряжений преобладают в северном и северо-западном обрамлении структуры. Центральный, наиболее продуктивный блок поднятия, как самостоятельный объект может рассматриваться в качестве структурного осложнения "правого вращения". Здесь преобладают, вследствие наличия закручивающих моментов, условия сжатия. Степень раскрытости трещин снижается. Меридиональное простирание Двуреченской структуры, наличие на восточном и западном склонах контрастных линейных террас меридионального простирания позволяет предположить участие широтных сжимающих напряжений в формировании купольной части структуры. В пределах трещинных зон меридионального простирания в своде структуры получены максимальные дебиты нефти из продуктивных пластов горизонта $Ю_1$ (скв. 67, 77, 85, 10).

В процессе изучения керна вертикальные трещины на месторождении обнаружены в образцах из скважин 12 и 15, в других скважинах трещиноватость в керне в продуктивных интервалах практически не проявляется, хотя наблюдается тесная связь особенностей нефтегазонасыщения с линейными элементами палеорельефа, которые, вероятно, послужили своеобразными "трансмиссиями" флюидонасыщения. Приуроченность зон высокой проницаемости к тектонически-напряжённым зонам в керне выявляется, в том числе, в интенсификации вторичного преобразования пород коллекторов (пятнистость, наличие крупных пор выщелачивания), развитии кливажа, разрушении образцов керна по слоистости.

Западно-Моисеевское поднятие (рис. 4) имеет северо-западное простирание. Особенности проявленности в морфологии отражающей поверхности этого поднятия "соосных уступов" позволяет предположить его формирование существенно в условиях сжимающих напряжений северо-восточной ориентировки. Максимальная открытость систем трещин наблюдается в северо-западном и юго-западном обрамлении структуры. Сигмоидный облик структуры говорит о преобладании при её формировании дугового перераспределения сжимающих напряжений, что явилось причиной интенсивного роста (и соответственно разрушения поднятия в различные фазы осадконакопления) и, вероятно, было причиной накопления мощных песчаных отложений в западном обрамлении поднятия. В условиях дугового перераспределения тектонических напряжений фронтальные системы трещин (восточное обрамление структуры) характеризуются как скрытые. Дислокации западного обрамления, при большей проявленности в рельефе, играют положительную роль в формировании зон высокого нефтегазонасыщения, что, вероятно, связано с "пластичностью" коллектора за счёт существенно глинистого цемента. Их положительная роль в формировании коллектора объясняется также "правым" (слабым) вращением структуры.

Западно-Моисеевское поднятие – структура "правого вращения" (в терминологии Я.Г. Каца и др. [6]). Эллиптически-расходящаяся канальная система трещин, осложняющая северо-западное обрамление свода в условиях закручивающих "правосторонних" напряжений формировалась существенно в условиях транспрессивных деформаций. Закрытость систем трещин способствовала снижению активности флюидомассопереноса и высокой сохранности залежи. Максимальная проницаемость и высокие мощности коллекторов (экстремальные повышения) связаны именно с зонами тектонических трещин, узлами пересечения трещин. Высокие дебиты углеводородов выявляются в скважинах 32, 25, 30, 41, 50, 22, 24 и др. и следует ожидать в зонах тектонической трещиноватости меридионального и

широтного простирания третьего, четвёртого порядков, в трещинных зонах участков компакции. На формирование западного структурного осложнения в условиях компакции и существенно транспрессивных напряжений указывают также максимальные градиенты поверхности западных структурных замыканий и "вогнутый" (в терминологии В.П. Ананьева, В.И. Коробкина) характер склона по отношению к обрамляющей глубокой впадине. Облик профиля продуктивной фации и плановая согласованность трёхзонального распределения (активных участков) рукавов песчаного палеокомплекса позволяют охарактеризовать песчаные образования коллектора как аккумулировавшиеся в условиях дельты (?), дельтовой протоки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шульц С.С. Планетарная трещиноватость. – М., 1973. – 347 с.
2. Микуленко К.И., Шенин Г.Г. Трещиноватость юрских и нижнемеловых пород Обь-Иртышского междуречья // Научные труды СНИИГиМС. – Новосибирск, 1971. – Вып. 132. – С. 90–101.
3. Мушин И.А., Л.Ю. Бродов, Е.А. Козлов, Ф.И. Хатьянов. Структурно-формационная интерпретация сейсмических данных. – М.: Недра, 1990. – 299 с.
4. Кузьмин С.Б. Оценка ширины зон активных разломов методами неотектоники и структурной геоморфологии (на примере Восточного Саяна и Западного Прибайкалья) // Геотектоника. – 1998. – № 1. – С. 37–46.
5. Копп М.Л. Новейшие деформации Скифской и юга Восточно-Европейской платформ как результат давления Аравийской плиты // Геотектоника. – 2000. – № 2. – С. 26–41.
6. Кац Я.Г., Козлов В.В., Полетаев А.И. Ротационные структуры Земной коры // Обзор ВИЭМС. – М., 1990. – 41 с.

УДК 552.513:553.982:551.763.1(571.16)